

Compensação Não-Linear de Reativos em Linhas de Transmissão por Reator Saturado

Concepção e Anteprojeto Construtivo

Marcelo José Albuquerque Maia
Chesf

Manoel Afonso de Carvalho Jr
UFPE

Luiz Antônio Magnata da Fonte
UFPE

Resumo – O artigo descreve os procedimentos para o anteprojeto de um protótipo de reator com saturação natural (RSN) destinado a subestação de Mossoró, localizada no sistema oeste da Chesf. O protótipo operará em 13,8 kV e desenvolverá 5,4 Mvar, devendo substituir um reator linear atualmente em operação no barramento de 13,8 kV dessa subestação. Diversos anteprojetos foram elaborados, com diferentes configurações e materiais magnéticos, sendo o julgamento pautado numa combinação do desempenho harmônico e no valor das perdas. O projeto foi desenvolvido no P&D Chesf, ciclo 2001/2002.

Palavras-chave – Controle de Tensão, Projeto de Protótipo, Reator Saturado.

I. INTRODUÇÃO

O sistema elétrico de potência da Chesf é pródigo em linhas de transmissão longas em decorrência não somente da sua vasta extensão territorial, mas também pela concentração do consumo de energia em regiões específicas e pela geração de vocação tipicamente hidrelétrica. Ora, uma das singularidades dos sistemas de transmissão longos em alta tensão é, justamente, a precária regulação de tensão oferecida nas barras de consumo, tanto em regime permanente como durante transitórios. Para combater esse comportamento inadequado, é prática comum na Chesf e demais empresas do setor elétrico promover a compensação de reativos do sistema de transmissão por intermédio dos tradicionais reatores lineares.

As desvantagens verificadas com o uso desse esquema de compensação residem, em primeiro lugar, na necessidade de execução de manobras de inserção ou remoção de equipamentos sempre que o carregamento do sistema experimentar mudanças significativas. Ainda mais, a contenção da tensão no contexto de uma rejeição de carga requer a permanência de reatores em funcionamento contínuo, indiferente ao carregamento imposto à linha de transmissão e, nessas circunstâncias, tais equipamentos passarão a exercer o papel de um consumidor permanente de potência reativa. Desse modo, os benefícios auferidos com a operação dos reatores durante o regime de baixa carga serão inteiramente convertidos em ônus na plena carga, pois parte da capacidade de transmissão da linha estará ocupada com o suprimento dos mesmos.

Uma das alternativas para superar os inconvenientes da associação convencional reator-capacitor foi apresentada por Brasil e Carvalho, [1], e utiliza reatores com saturação natural (RSN) em vez do reator linear. De fato, a característica tensão×corrente exibida por esses

equipamentos, esboçada na Figura 1, parece feita sob medida para a aplicação pretendida:

- nas tensões mais baixas, ou seja, na condição de plena carga, o RSN funcionará na vizinhança do ponto (V_s , I_ϕ), demandando, dessa forma, uma potência irrisória do sistema, inferior a 10 % do seu valor nominal;
- à proporção que a carga do sistema diminui, a tensão experimenta uma elevação correspondente, o que desloca o ponto de operação do RSN para as proximidades de (V_n , I_n), elevando o seu consumo numa proporção ditada pela inclinação da sua característica, a qual, em princípio, poderá ser especificada para satisfazer qualquer nível de compensação desejada.

Tal comportamento, além de ensejar um controle contínuo

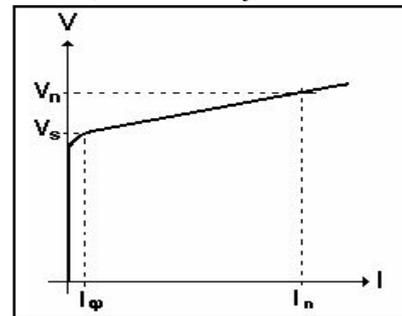


Figura 1. Característica operacional de um RSN

da tensão dentro de patamares determinados, disponibilizará toda a capacidade da linha de transmissão exclusivamente para o transporte de energia para atendimento das cargas, como demonstraram Carvalho e Fonte, [2] e [3].

Diante dessa conjuntura, o Laboratório Digital de Sistemas de Potência (LDSP), do Departamento de Engenharia Elétrica e Sistemas de Potência (DEESP) da Universidade Federal de Pernambuco (UFPE) decidiu investir num programa de pesquisa relacionado com os RSNs, o qual motivou o desenvolvimento de diversas dissertações de mestrado, [4] até [7], uma tese de doutorado, [8], e inúmeras publicações em seminários, simpósios, encontros, congressos e conferências nacionais e internacionais, [1], [9] até [15]. Antes mesmo do advento da Lei 9991/2000, a Chesf mostrou interesse na pesquisa do RSN e firmou convênio com a UFPE em 1999 para desenvolver modelos digitais e construção de um protótipo para instalação em seu sistema de transmissão. Com a conclusão da fase experimental da pesquisa dos RSNs, a etapa seguinte consistiria na extensão dos resultados obtidos em laboratório para o campo industrial, através do desenvolvimento de um protótipo em tamanho natural e da aplicação do mesmo a um sistema de potência real

O presente artigo, oriundo de um projeto de P&D Chesf de igual nome do Ciclo 2001/2002, já utilizando o que dispõe a Lei 9991/00, descreve o processo de seleção, no sistema de transmissão Chesf, de um ponto apropriado para a conexão de um RSN, de especificação das características operacionais mais adequadas para tal equipamento e de desenvolvimento de um projeto básico para o protótipo de RSN.

II. SELEÇÃO DO PONTO DE CONEXÃO

Um exame do sistema de transmissão operado pela Chesf apontou para a tensão de 13,8 kV como a mais recomendada para instalação de um protótipo de RSN. Abaixo dessa tensão, um RSN não produziria qualquer efeito significativo na operação do sistema. Por outro lado, acima de 13,8 kV, embora se disponha dos conhecimentos necessários para o desenvolvimento do projeto, as dificuldades para a construção do protótipo tomariam grande vulto, o que poderia por em risco a viabilidade de toda a pesquisa.

As subestações do sistema Chesf foram, então, analisadas no que tange a presença de reatores lineares no setor de 13,8 kV, frequentemente manobrados com a evolução da carga. Tais ações poderiam ser perfeitamente evitadas caso os reatores lineares fossem substituídos por RSNs, pois esses equipamentos se amoldam, naturalmente, às variações da carga sem exigir qualquer intervenção dos operadores.

A luz desses critérios, o barramento de 13,8 kV da subestação de Mossoró foi o ponto eleito para a conexão do protótipo de RSN.

III. CARACTERÍSTICA DO RSN

O reator linear de 5 MVA atualmente instalado no barramento de 13,8 kV da subestação de Mossoró apenas permanece conectado ao sistema Chesf durante o período de carga leve, sendo removido da rede nas demais condições de carregamento. O RSN que substituirá tal reator deverá, portanto, exibir um comportamento similar, ou seja, absorver a mesma potência reativa quando da carga leve, reduzindo paulatinamente esse consumo até cessar completamente por ocasião da carga pesada.

Com o intuito de levantar o perfil da tensão estimada para a barra de ligação do RSN, exatamente no ano previsto para a instalação do mesmo, uma consulta ao site da ONS permitiu a identificação dos seguintes arquivos de dados relacionados com o sistema interligado nacional:

- Carga leve (Jul-07-LEV*PAR 05-07*01/09/04);
- Carga média (Jul-07-MED*PAR 05-07*01/09/04);
- Carga pesada (Dez-07-PES*PAR05-07*01/09/04).

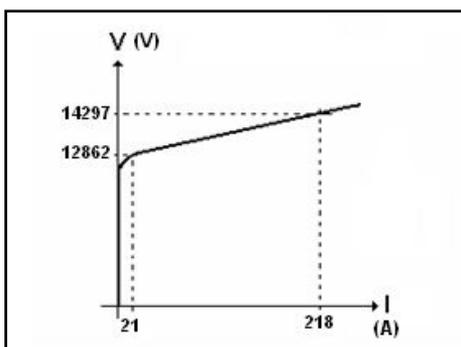


Figura 2. Característica do protótipo de RSN

Com base nesses arquivos, fluxos de potência foram simulados com o auxílio do programa ANAREDE do Cepel, cujos resultados ensejaram a definição da característica da Figura 2 para o protótipo de RSN.

IV. ESTRUTURA MAGNÉTICA DO PROTÓTIPO

O projeto de um RSN requer, em primeiro lugar, uma definição da estrutura magnética do mesmo em termos de:

- Número de núcleos constituintes da estrutura;
- Configuração geral da estrutura;
- Tipo do material magnético para fabricação.

A. Número de Núcleos

Os estudos elaborados no âmbito do LDSP [5], mostram que a intensidade das componentes harmônicas observadas na corrente de alimentação de um RSN guarda uma relação inversa com o número de núcleos, de sorte que quanto maior for essa quantidade, menor será a magnitude das harmônicas características. Tal comportamento já era conhecido da GEC, tanto que, nos últimos anos de produção, essa empresa limitou-se aos RSNs de 9 núcleos, o mesmo ocorrendo, atualmente, com as empresas russas.

Considerando-se as razões expostas, o RSN destinado à subestação de Mossoró deverá ser projetado com uma estrutura magnética contendo 9 núcleos para assegurar um desempenho harmônico compatível com as exigências vigentes no setor elétrico nacional.

B. Configuração Geral da Estrutura

A estrutura magnética de um RSN é constituída não somente por núcleos, mas requer a utilização de outros componentes que, associados entre si, assegurem uma trajetória fechada para o fluxo. Para o caso de um RSN com 9 núcleos, a Figura 3 apresenta as três alternativas usuais para a formação da estrutura magnética do mesmo:

- *Estrutura individualizada* – onde cada um dos núcleos possui um circuito magnético próprio, tal como assinala a Figura 3A;
- *Estrutura em monobloco* – onde os 9 núcleos do RSN estão reunidos numa estrutura única, como retrata a Figura 3B;
- *Estrutura em monoblocos parciais* – onde a estrutura única do arranjo anterior é dividida em unidades com

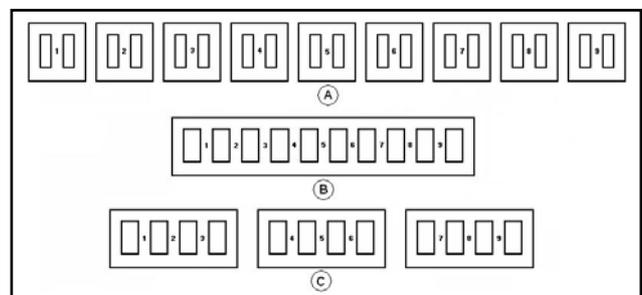


Figura 3. Alternativas para a estrutura magnética de 9 núcleos

três núcleos cada, como destaca a Figura 3C.

A opção com circuitos magnéticos individuais, Figura 3A, foi a eleita pela ACEC, empresa belga, para os RSNs de 6 núcleos da sua linha normal de fabricação. A despeito dessa preferência, essa é a alternativa que exige o maior dispêndio de material ferromagnético dentre aquelas esboçadas na

Figura 3 e, por isso, não será considerada nos estudos de projeto do RSN.

A estrutura em monoblocos parciais, Figura 3C, foi uma proposta original dos estudiosos russos [16], para tornar exequíveis os RSNs de grande porte, cujo peso ultrapassava determinados limites. Ora, para o caso em apreço, o RSN deverá desenvolver, em regime permanente, uma potência máxima de 5,4 Mvar, de sorte que não se enquadra nesta categoria. Assim, a estrutura mais apropriada para o RSN destinado à subestação de Mossoró será aquela em monobloco único, Figura 3B.

C. Tipo do Material Magnético

Para a concepção do protótipo de RSN, dois tipos de material magnéticos serão considerados:

- Aço silicioso de grão orientado (GO) com espessura de 0,35 mm, manufaturado pela KAWASAKI com o título de RG8H [17];
- Aço silicioso de grão não-orientado (GNO) com espessura de 0,5 mm e produzido pela ACESITA sob a denominação E-170 [18].

Os aços de grão orientado foram os preferidos pelos fabricantes dos RSNs por exibirem uma elevada indução de saturação e perdas muito reduzidas. Tais peculiaridades possibilitam o projeto de RSNs com menores dimensões, maior rendimento e, também, com pequenas inclinações da curva operacional $V \times I$. O único inconveniente desse tipo de material é o alto custo de aquisição, pois, afinal, se trata de um produto importado.

Os aços de grão não-orientado, por seu turno, não oferecem as mesmas vantagens, todavia, são ofertados no mercado nacional por preços bem inferiores até por conta da existência de fornecedores em território brasileiro. Esse é um material corriqueiramente empregado pelos fabricantes de transformadores de distribuição e, por essa razão, foi incluído nos estudos de projeto do RSN, já que a perspectiva é promover a produção do protótipo de RSN numa empresa instalada no país.

A figura 4 retrata a curva normal de magnetização para esses dois tipos de aços.

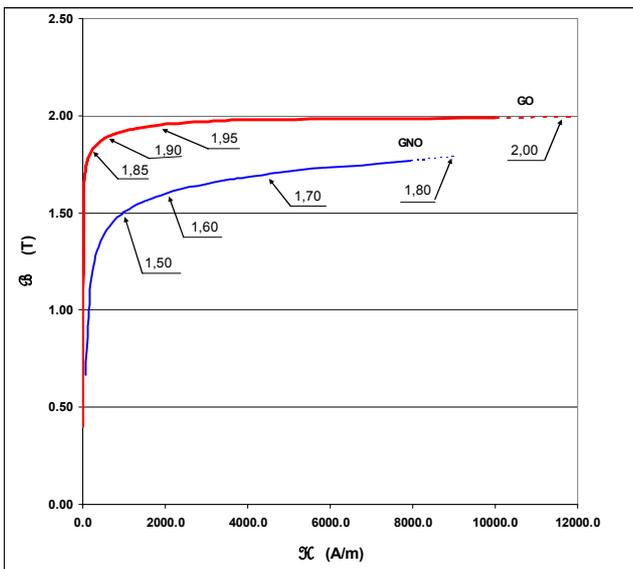


Figura 4. Curvas normais de magnetização dos aços GO e GNO

V. ESTRUTURA ELÉTRICA DO PROTÓTIPO

Nos estudos de projeto do RSN para a subestação de Mossoró serão apreciadas todas as configurações elétricas conhecidas para esse tipo de equipamento, a saber:

- *Ligação série dos enrolamentos primários* – ilustrada na Figura 5A devendo-se examinar tanto a opção com enrolamentos secundários curto-circuitados, como o arranjo isento desse recurso;
- *Ligação paralela dos enrolamentos primários aos moldes GEC (General Electric Co.)* – delineada na Figura 5B e que somente será avaliada na configuração com enrolamentos secundários conectados em curto-circuito;
- *Ligação paralela dos enrolamentos primários aos moldes TTU (Tallinn Technical University)* – esboçada na Figura 5C e também considerada na análise com os enrolamentos secundários em curto-circuito.

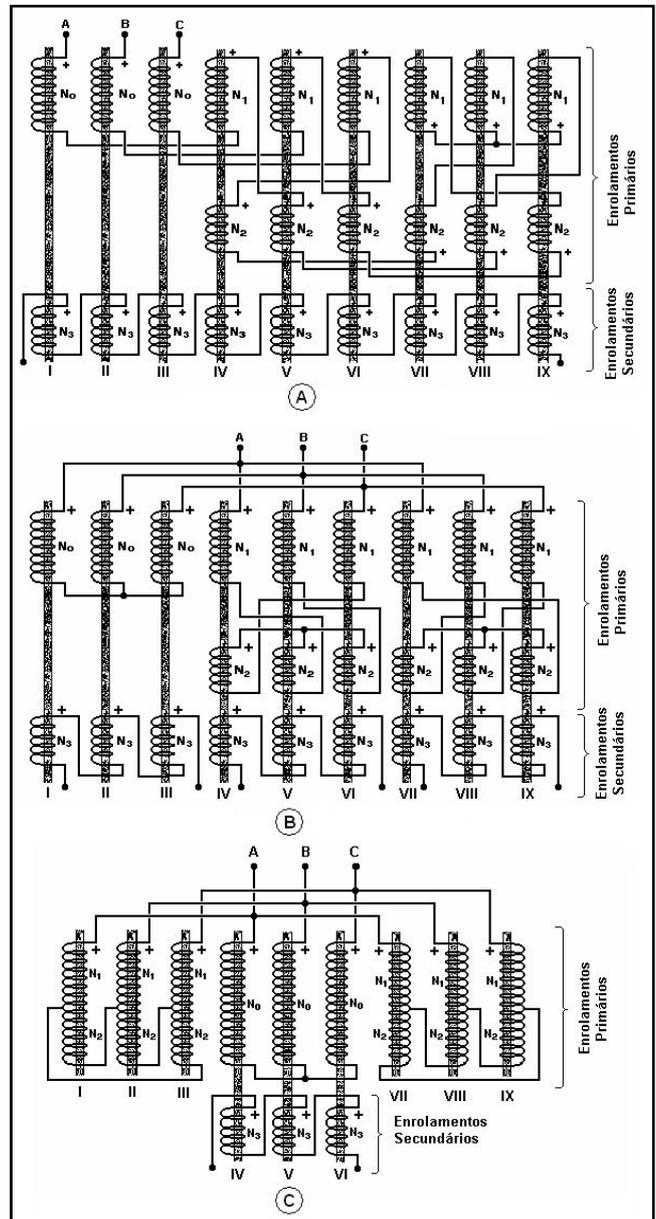


Figura 5. Estruturas elétricas de um RSN de 9 núcleos

VI. METODOLOGIA DE PROJETO DO RSN

As peculiaridades dos RSNs exigiram o desenvolvimento de rotinas de projeto a menos hermética possível, de modo a proporcionar uma maior flexibilização dos dados de entrada e dos elementos de controle do projeto. Com essa finalidade, as dimensões e a indução de trabalho dos núcleos, em vez de serem determinados por cálculos como ocorre nos transformadores, foram convertidas em variáveis manipuladas pelo usuário para promover a convergência do processo. A sensibilidade acerca da influência desses parâmetros no projeto do RSN, auferida com esse procedimento, compensa, sem dúvida, a reduzida experiência construtiva.

Com o intuito de obter uma maior presteza ao processo, a ferramenta eleita para a avaliação do desempenho dos anteprojetos dos RSNs foi o programa de transitórios eletromagnéticos EMTP-ATP, fazendo-se uso de modelos matemáticos apropriados para a representação desses equipamentos. Assim, uma vez definidos os contornos principais de um projeto preliminar, os parâmetros do modelo matemático correspondente deverão ser determinados para permitir as simulações naquele programa. O comportamento operacional levantado dessa maneira será, então, confrontado com a especificação desejada para o RSN, o que ensejará a definição dos ajustes necessários ao anteprojetado formulado preliminarmente. Um fluxograma dessa metodologia de projeto para os RSNs é apresentado sucintamente na Figura 6.

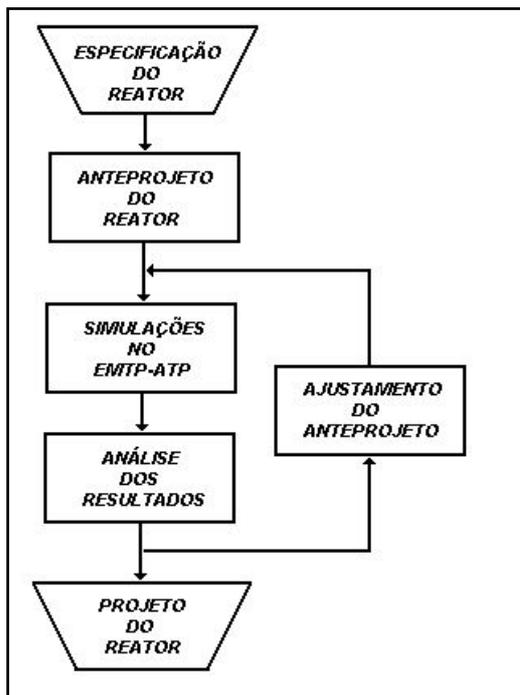


Figura 6. Fluxograma da metodologia de projeto

VII. ANTEPROJETOS DO RSN

Os pontos de início da saturação nos diferentes anteprojetos do RSN destinado à subestação de Mossoró, Figura 4, foram selecionados de sorte a abranger toda a região tida como saturada dos materiais magnéticos. O primeiro ponto eleito situou-se, então, no “cotovelo” da

curva de magnetização, 1,50 T para o aço de grão não-orientado (GNO) e 1,85 T para o aço de grão orientado (GO), e o último localizou-se na região dita de profunda saturação do material, 1,80 T no GNO e 2,00 T no GO. Com as fronteiras assim definidas pretendeu-se uma prospecção detalhada da influência exercida pelo ponto de saturação no desempenho do RSN.

A. Reatores com Enrolamentos em Série

O RSN com enrolamentos primários conectados em série foi examinado, inicialmente, sem a presença dos enrolamentos secundários (N3) mostrados na Figura 5A e com uma estrutura magnética constituída pelo aço do tipo grão não-orientado (GNO), ACESITA E-170. Para cada valor da indução, estimativas iniciais foram adotadas para a altura e o diâmetro das colunas, as quais foram ajustadas até obter-se um desempenho satisfatório conforme as simulações do EMTP-ATP. Os valores finais da altura e do diâmetro das colunas do RSN para cada uma das induções podem ser apreciados na Tabela 1. A característica externa levantada para cada um desses RSNs encontra-se esboçada na Figura 7 juntamente com a característica especificada.

INDUÇÃO (T)	DIMENSÕES COLUNAS (mm)	
	Diâmetro	Altura
1,50	480,00	1420,00
1,60	345,00	1260,00
1,70	310,00	860,00
1,80	290,00	690,00

Tabela 1. Dimensões dos RSNs série sem N3 e com aço GNO

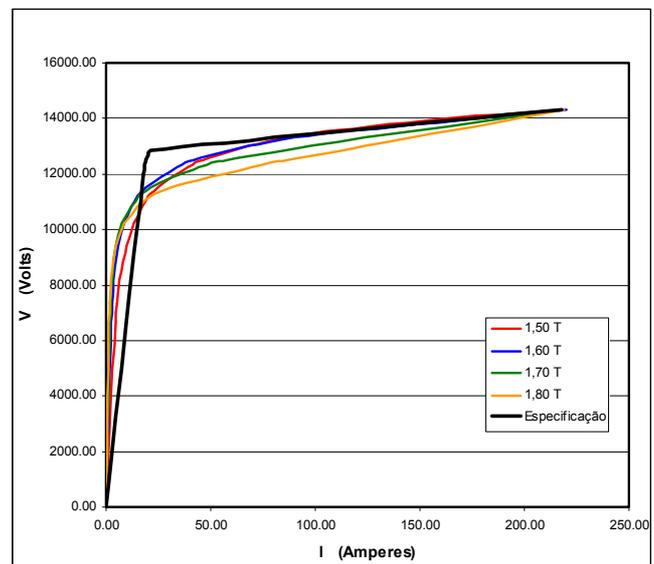


Figura 7. Característica dos RSNs série sem N3 e com aço GNO

A permuta do tipo de aço silicioso utilizado na estrutura magnética dos RSNs de grão não-orientado para grão orientado produziu importantes alterações nos anteprojetos, particularmente nas dimensões das colunas, Tabela 2. Também, o comportamento operacional dos anteprojetos ajustaram-se quase exatamente ao prescrito na especificação, Figura 8.

INDUÇÃO (T)	DIMENSÕES COLUNAS (mm)	
	Diâmetro	Altura
1,85	160,00	1185,00
1,90	140,00	1200,00
1,95	135,00	1110,00
2,00	120,00	1240,00

Tabela 2. Dimensões dos RSNs série sem N3 e com aço GO

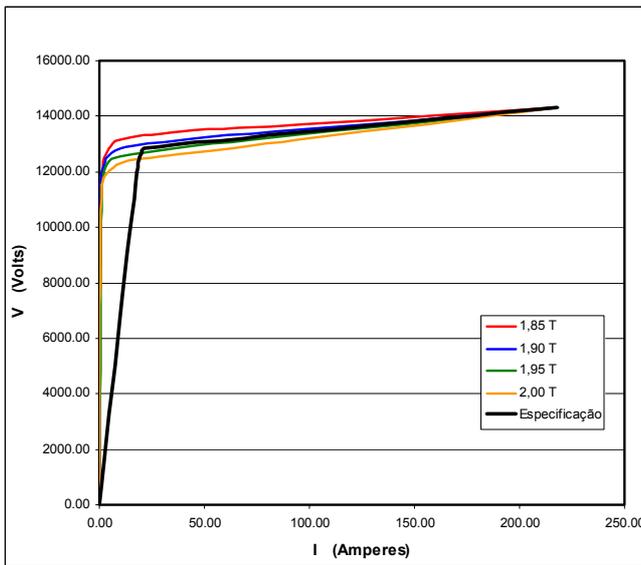


Figura 8. Característica dos RSNs série com N3 e aço GO

A ativação dos enrolamentos secundários não motivou alterações relevantes nas dimensões das colunas, como se verifica na Tabela 3 para a construção com aço GNO, e Tabela 4 para o aço GO. Portanto, as características tensão×corrente desses anteprojetos foram similares aos anteriores, Figuras 7 e 8 respectivamente.

INDUÇÃO (T)	DIMENSÕES COLUNAS (mm)	
	Diâmetro	Altura
1,50	470,00	1400,00
1,60	340,00	1240,00
1,70	310,00	850,00
1,80	290,00	690,00

Tabela 3. Dimensões dos RSNs série com N3 e aço GNO

INDUÇÃO (T)	DIMENSÕES COLUNAS (mm)	
	Diâmetro	Altura
1,85	340,00	1185,00
1,90	275,00	1210,00
1,95	235,00	1215,00
2,00	205,00	1260,00

Tabela 4. Dimensões dos RSNs série com N3 e aço GO

B. Reatores com Enrolamentos em Paralelo (Modelo GEC)

Os RSNs pertencentes a essa família estão configurados conforme a Figura 5B, sendo que os três grupamentos de enrolamentos secundários (N3) estarão, agora, sujeitos a um curto-circuito franco. A estrutura magnética desses RSNs será, nessa primeira etapa dos estudos, constituída pelo aço do tipo grão não-orientado (GNO), ACESITA E-170. Após a fase inicial de ajustamento do anteprojetado de RSN para cada uma das induções definidas na Figura 4, as colunas assumiram as dimensões apresentadas na Tabela 5. As características externa desses RSNs exibiram, para cada indução de projeto, um comportamento similar ao da Figura 7.

INDUÇÃO (T)	DIMENSÕES COLUNAS (mm)	
	Diâmetro	Altura
1,50	880,00	1780,00
1,60	695,00	1190,00
1,70	500,00	1160,00
1,80	390,00	1220,00

Tabela 5. Dimensões dos RSNs paralelo GEC com aço GNO

A substituição do aço de grão não-orientado pelo aço de grão orientado para a estrutura dos RSNs com ligação paralela ensejou sensíveis alterações nas dimensões das colunas para os diversos anteprojetos. A Tabela 6 mostra o perfil final das colunas dos RSNs construídos com aço tipo GO e um confronto com a Tabela 5 evidenciam os ganhos obtidos. Em termos da característica tensão×corrente, resultados semelhantes aos da Figura 8 foram obtidos.

INDUÇÃO (T)	DIMENSÕES COLUNAS (mm)	
	Diâmetro	Altura
1,85	340,00	1185,00
1,90	275,00	1210,00
1,95	235,00	1215,00
2,00	205,00	1260,00

Tabela 6. Dimensões dos RSNs paralelo GEC com aço GO

C. Reatores com Enrolamentos em Paralelo (Modelo TTU)

Os estudos de projeto dos RSNs com enrolamentos primários conectados em paralelo aos moldes da TTU, Figura 5C, e com enrolamentos secundários postos em curto-circuito franco foram encetados assumindo uma estrutura magnética confeccionada com o aço de grão não-orientado ACESITA E-170. Após os ajustes de praxe, obteve-se as dimensões assinaladas na Tabela 7 para as colunas dos RSNs operando sob induções de saturação distintas. Um confronto entre essa tabela e aquela fornecida para o RSN também com ligação paralela, mas aos moldes da GEC, Tabela 5, mostra uma semelhança bastante acentuada nas dimensões das colunas para essas duas

variantes, de sorte que o desempenho operacional dos RSNs com a configuração TTU assemelha-se àquela da Figura 7.

INDUÇÃO (T)	DIMENSÕES COLUNAS (mm)	
	Diâmetro	Altura
1,50	880,00	1530,00
1,60	695,00	1180,00
1,70	500,00	1160,00
1,80	390,00	1210,00

Tabela 7. Dimensões dos RSNs paralelo TTU com aço GNO

O uso do aço de grão orientado para o núcleo dos RSNs resultaram em colunas com as dimensões indicadas na Tabela 8 e um comportamento operacional similar àquele retratado pela Figura 8.

INDUÇÃO (T)	DIMENSÕES COLUNAS (mm)	
	Diâmetro	Altura
1,85	328,00	1225,00
1,90	267,00	1210,00
1,95	225,00	1215,00
2,00	205,00	1200,00

Tabela 8. Dimensões dos RSNs paralelo TTU com aço GO

VIII. COMPORTAMENTO HARMÔNICO

A norma IEEE Std. 519 na sua versão mais recente, [19], prescreve para tensões iguais ou inferiores a 69 kV, como ocorre no caso em apreço, os limites assinalados na Tabela 9 para as componentes harmônicas de ordem ímpar, expressos em % da fundamental. Para aplicação desses critérios normalizados é imprescindível que se disponha do nível de curto-circuito no ponto de conexão do RSN, o qual deverá ser determinado por simulações do Subsistema Mossoró no EMTP-ATP.

I_{curto} I_{carga}	Distorção Harmônica Individual (DHI) (%)					DHT (%)
	$h < 11$	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$h \geq 35$	
< 20	4,0	2,0	1,5	0,6	0,3	5,0
20 - 50	7,0	3,5	2,5	1,0	0,5	8,0
50 - 100	10,0	4,5	4,0	1,5	0,7	12,0
100 - 1000	12,0	5,5	5,0	2,0	1,0	15,0
> 1000	15,0	7,0	6,0	2,5	1,4	20,0

Tabela 9. Distorção harmônica da corrente (IEEE Std.519)

A simulação no EMTP-ATP de um curto-circuito trifásico franco na barra de 13,8 kV da subestação de Mossoró, local de aplicação do RSN, apontou um valor eficaz para a corrente de estado permanente de 10.743 A. Ora, a corrente do RSN especificado para Mossoró alcança, apenas, 218 A quando em regime nominal de funcionamento, como registra a Figura 2, portanto, cerca de 50 vezes menor que a corrente verificada por ocasião do curto-circuito. Nessas circunstâncias, a adoção dos valores limites para a distorção

de corrente prescritos na faixa 20–50 da relação (I_{curto}/I_{carga}) da Tabela 9 parece inteiramente satisfatória para uma avaliação prévia do desempenho harmônico do RSN.

Uma outra cláusula prevista na norma IEEE citada refere-se à majoração dos limites recomendados na Tabela 9 quando o dispositivo examinado operar em regime de pulsos, como se dá com os RSNs, sendo esse fator definido pela expressão:

$$\sqrt{\frac{q}{6}} \tag{1}$$

onde q representa o número de pulsos. Desde que o modelo de 9 (nove) núcleos foi o escolhido para o RSN destinado à subestação de Mossoró, as ordens das frequências características do mesmo alcançarão:

$$h = 18n \pm 1 \quad \forall \quad n \in N \tag{2}$$

significando que a corrente será formada por 18 pulsos, o que, portanto, permitirá uma elevação dos valores previstos na Tabela 9 para as componentes harmônicas características do mesmo de um fator igual a $\sqrt{3}$.

Tal mitigação nos limites normalizados com respeito aos harmônicos típicos do RSN é acompanhada, em contrapartida, por uma exacerbação das exigências para as componentes de frequências distintas dessas. A norma IEEE Std. 519 estabelece, nesse caso, que a magnitude desses harmônicos não-característicos deverá permanecer abaixo de 25% dos valores originais da Tabela 9. Combinando essa regulamentação com aquela do parágrafo anterior, a Tabela 10 foi construída e expressará, daqui por diante, os limites máximos permitidos para as componentes harmônicas na corrente do RSN de Mossoró em % da fundamental.

Ordem harmônica	Intensidade %
$h < 11$	1,75
$11 \leq h < 17$	0,875
$17 \leq h \leq 19$	4,33
$19 < h < 23$	0,625
$23 \leq h < 35$	0,25
$35 \leq h \leq 37$	0,866
$37 < h \leq 53$	0,125
$53 \leq h \leq 55$	0,866
$55 < h < 71$	0,125
$71 \leq h \leq 73$	0,866
$73 < h$	0,125

Tabela 10. Limites de distorção para o RSN de Mossoró

Concernente à distorção harmônica total da corrente, designada pela sigla DHT na Tabela 9, a norma IEEE não faz qualquer distinção particular entre consumidores, de modo que o valor originalmente especificado para a faixa de interesse, 8,0% da componente fundamental, deverá ser respeitado. Quanto às componentes harmônicas de ordem par, essa norma prescreve intensidades 25% inferior àquelas assinaladas na Tabela 9.

O comportamento harmônico do conjunto de RSNs proposto neste tópico, foi obtido mediante simulações idealizadas no EMTP-ATP, onde cada RSN recebeu alimentação de uma fonte de tensão trifásica equilibrada e

com forma de onda perfeitamente senoidal. A determinação da intensidade de cada uma das componentes harmônicas da corrente solicitada pelos RSNs ocorreu na condição operacional mais crítica, a plena carga, onde funcionam sob profunda saturação. A técnica utilizada com essa finalidade foi, naturalmente, a análise de Fourier, recurso disponível no menu do EMTP-ATP.

Uma vez definido os limites recomendados por norma para a distorção harmônica na barra de 13,8 kV de Mossoró, um perfil harmônico foi, então, delineado para o RSN de 9 núcleos destinado a esse local, expresso na Tabela 10 para as componentes individuais e no DHT de 8,0 %. Sob a ótica desse perfil, o elenco de anteprojetos de RSN será, agora, examinado.

A. Reatores com Enrolamentos em Série

As Figuras 9, 10, 11 e 12 apresentam a magnitude das componentes harmônicas desenvolvida pelos RSNs até a 81ª, juntamente com os limites respectivos de conformidade com a Tabela 10, todos expressos em % da componente fundamental. Um exame dessas figuras demonstram claramente que apenas os RSNs munidos de enrolamentos secundários N₃, com estrutura magnética construída com base no aço de grão não-orientado, GNO, e operando com níveis de indução igual ou superior a 1,70 T exibem um teor harmônico satisfatório para a barra de 13,8 kV de Mossoró.

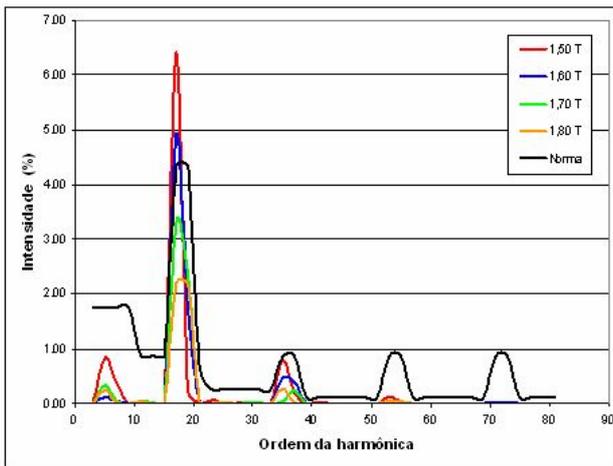


Figura 9. Harmônicos nos RSNs série, com N₃ e aço GNO

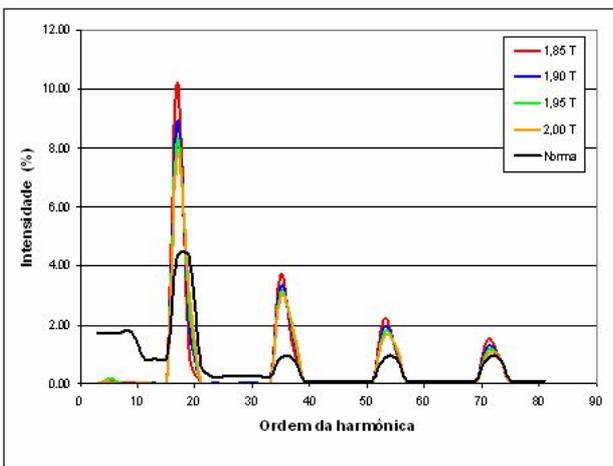


Figura 10. Harmônicos nos RSNs série, sem N₃ e aço GNO

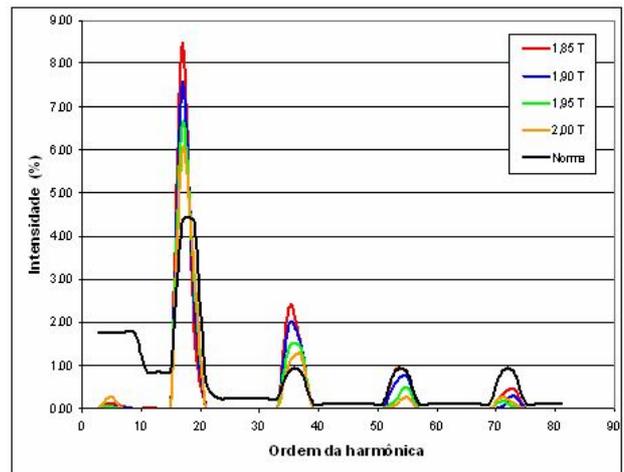


Figura 11. Harmônicos nos RSNs série, com N₃ e aço GO

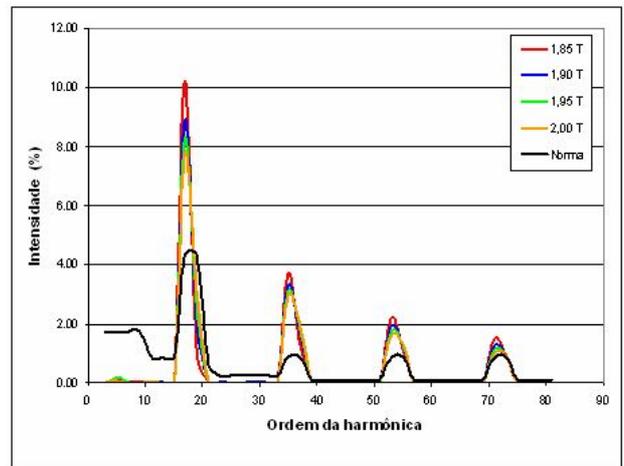


Figura 12. Harmônicos nos RSNs série, sem N₃ e aço GO

Em termos da distorção harmônica total da corrente, DHT, a Tabela 11 reúne os valores calculados para cada um dos anteprojetos de RSNs com ligação série e, sob o crivo da norma IEEE Std. 519 constata-se que, somente nas induções mais baixas e na ausência dos enrolamentos secundários N₃, o limite estabelecido para a distorção total, 8,0% da componente fundamental, será ultrapassado.

Aço de grão não-orientado GNO			Aço de grão orientado GO		
B (T)	DHT (%)		B (T)	DHT (%)	
	Com N ₃	Sem N ₃		Com N ₃	Sem N ₃
1,50	6,54	8,38	1,85	9,18	11,41
1,60	5,25	7,87	1,90	8,35	10,27
1,70	4,05	7,43	1,95	7,54	9,78
1,80	3,12	7,17	2,00	6,99	9,44

Tabela 11. Distorção total da corrente nos RSNs com ligação série

B. Reatores com Enrolamentos em Paralelo (Modelo GEC)

O desempenho harmônico dos RSNs dispoendo de enrolamentos primários conectados em paralelo nos moldes preconizados pela GEC encontra-se registrado nas Figuras 13 e 14. Nessas mesmas figuras, além da intensidade das componentes harmônicas produzidas pelos RSNs em apreço,

também estão consignados os limites admitidos para cada ordem harmônica, conforme a especificação da Tabela 10. É evidente de uma apreciação dessas figuras que, apenas os RSNs fabricados com estrutura magnética de aço de grão orientado, GO, e operando com indução igual ou inferior a 1,90 T violam os limites prescritos na Tabela 10.

C. Reatores com Enrolamentos em Paralelo (Modelo TTU)

Os RSNs com enrolamentos primários também conectados em paralelo porém observando as orientações da TTU mostraram, igualmente, um desempenho harmônico superior, como comprovam as Figuras 15 e 16. Somente um de cada grupo de RSNs fabricados com o mesmo material magnético, justamente aquele com menor indução de saturação, não preencheu os requisitos exigidos pela barra de 13,8 kV de Mossoró.

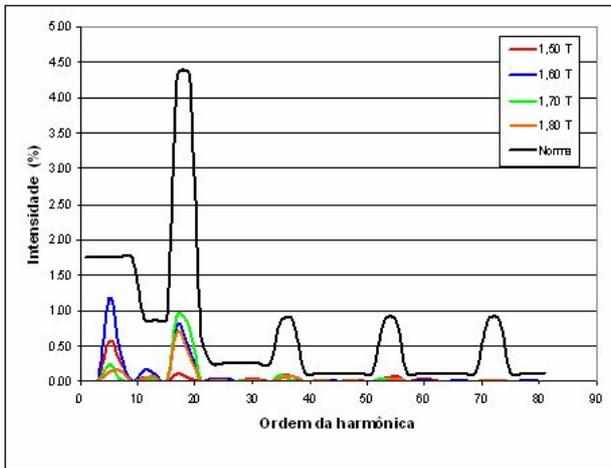


Figura 13. Harmônicos nos RSNs paralelo GEC e aço GNO

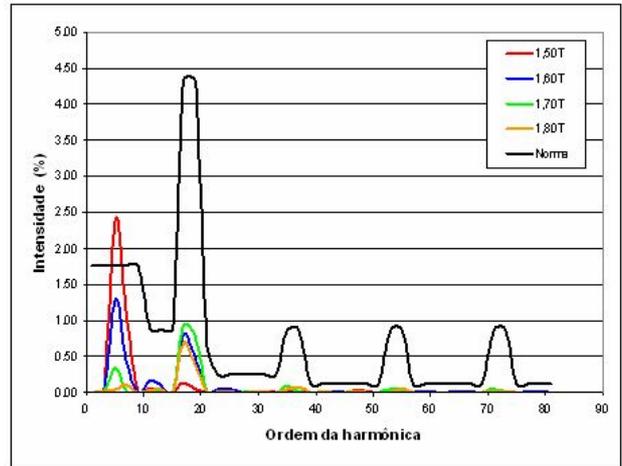


Figura 15. Harmônicos nos RSNs paralelo TTU e aço GNO

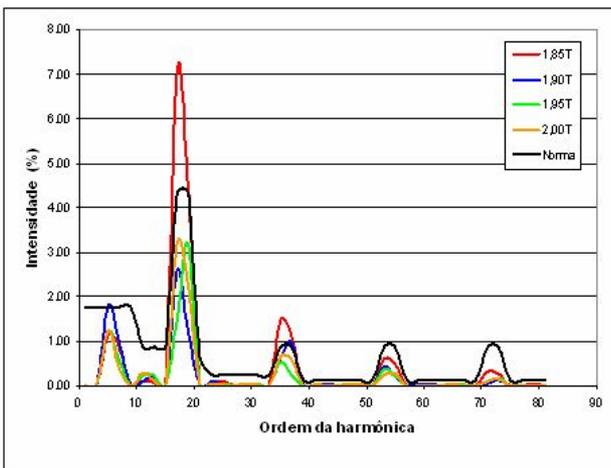


Figura 14. Harmônicos nos RSNs paralelo GEC e aço GO

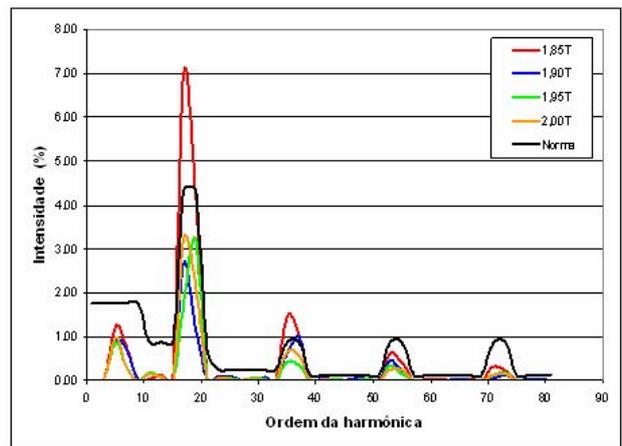


Figura 16. Harmônicos nos RSNs paralelo TTU e aço GO

No que tange a distorção harmônica total na corrente, os RSNs com ligação paralela dos enrolamentos ostentam um desempenho bastante satisfatório, pois somente um dos anteprojetos analisados ultrapassou o limite de 8% da componente fundamental prescrito pela norma IEEE Std. 519. Trata-se, como indica a Tabela 12, do RSN com estrutura magnética de aço de grão orientado, GO, e saturando em 1,85 T.

Como no caso anterior, os RSNs com ligação paralela da TTU produziram uma distorção harmônica total na corrente inferior ao limite de 8,0% estabelecido na norma IEEE Std. 519. Como no caso anterior, apenas o RSN formado com o aço de grão orientado, GO, e projetado para saturar em 1,85 T violou esse limite, como mostra a Tabela 13.

Aço de grão não-orientado GNO		Aço de grão orientado GO	
\mathcal{B} (T)	DHT (%)	\mathcal{B} (T)	DHT (%)
1,50	0,67	1,85	8,76
1,60	1,57	1,90	3,75
1,70	1,23	1,95	3,87
1,80	0,83	2,00	4,26

Tabela 12. Distorção total da corrente nos RSNs paralelo GEC

Aço de grão não-orientado GNO		Aço de grão orientado GO	
\mathcal{B} (T)	DHT (%)	\mathcal{B} (T)	DHT (%)
1,50	2,65	1,85	8,56
1,60	1,68	1,90	3,40
1,70	1,26	1,95	3,84
1,80	0,79	2,00	4,14

Tabela 13. Distorção total da corrente nos RSNs paralelo TTU

IX. RENDIMENTO DOS PROTÓTIPOS

Os estudos harmônicos do tópico anterior concluíram que, dos 32 anteprojetos propostos para o RSN destinado ao barramento de 13,8 kV de Mossoró, apenas 14 satisfizeram os requisitos harmônicos impostos pela norma IEEE Std. 519. Uma nova triagem, desta vez à luz das perdas, reduz ainda mais o conjunto de protótipos de interesse para a análise. Das 14 unidades eleitas pelo critério do desempenho harmônico, apenas 6, duas de cada tipo de RSN, foram selecionadas sob o prisma do rendimento, Tabela 14.

MODELO	LIGAÇÃO	AÇO	β (T)	PERDAS (%)		
				Cobre	Ferro	Totais
1	Série	GNO	1,70	0,65	0,16	0,81
2	Série	GNO	1,80	0,55	0,16	0,71
3	Paralelo GEC	GO	1,95	0,34	0,50	0,84
4	Paralelo GEC	GO	2,00	0,29	0,55	0,84
5	Paralelo TTU	GO	1,95	0,31	0,28	0,59
6	Paralelo TTU	GO	2,00	0,28	0,32	0,60

Tabela 14. Anteprojetos eleitos pelo critério do rendimento

X. ANÁLISE ECONÔMICA

O conjunto de protótipos relacionados na Tabela 14 foi, então, apreciado agora segundo o crivo do custo de produção de cada um, o que requer um exame da quantidade de material ativo, ferro e cobre, despendida pelos mesmos. Como demonstra a Tabela 15, os modelos 1 e 2 são os mais econômicos, pois, além da menor quantidade de material, especialmente de cobre, ainda utilizam o aço GNO, muito menos custoso que os aços GO. Como o modelo 2 emprega cerca de 30% a menos de ferro, enquanto o cobre usado é somente 3% maior, esta foi a opção recomendada para o protótipo de RSN destinado a subestação de Mossoró.

MODELO	FERRO (kg)	COBRE (kg)
1	3.783	953
2	2.687	982
3	5.376	2.097
4	4.083	2.437
5	4.635	1.632
6	3.851	1.792

Tabela 15. Quantidade de material ativo por protótipo

XI. CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou todo o desenvolvimento realizado para a construção de um RSN dentro de um projeto de P&D Chesf realizado conjuntamente com o LDSP-UFPE e demonstra que se dispõe das ferramentas necessárias para a concepção de RSNs, o que assegura, ao setor elétrico nacional, a real perspectiva de dispor desses equipamentos para a compensação de sistemas de potência.

Os anteprojetos de RSN desenvolvidos, apesar de dispor de 9 colunas, não utilizam uma quantidade maior de ferro

que um transformador trifásico de mesma potência e tensão nominal. De acordo com as informações disponíveis, [20], um transformador de 5,4 MVA e 13,8 kV empregaria cerca de 5000 kg de ferro para a construção da sua estrutura magnética, portanto, o dobro do RSN eleito para Mossoró.

No tocante ao cobre, segundo a mesma fonte, [20], o transformador consumiria aproximadamente 900 kg, o mesmo valor empregado pelo RSN selecionado.

Finalmente, as perdas registradas para os protótipos de RSN, 0,84% no máximo conforme a Tabela 14, são inferiores ao valor fornecido por [21] para transformadores com potência similar.

XII. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] BRASIL, D. O. C. e CARVALHO, M. A., *Saturated Reactors Applied in Transmission Systems*, IPST, International Conference on Power System Transients, Lisboa, September 1995.
- [2] CARVALHO, M. A. e FONTE, L. A. M., *Increasing the Capacity of Long EHV Transmission Lines*, IEEE / PES Transmission and Distribution Latin America Conference, São Paulo, 2001.
- [3] CARVALHO, M. A. e FONTE, L. A. M., *Increasing the Capacity of Long EHV Transmission Lines by Saturated Reactors*, XIV CBA, Congresso Brasileiro de Automática, Natal, 2001.
- [4] BRASIL, D. O. C., *Aplicação de Reatores Saturados em Sistemas de Transmissão*, Dissertação de Mestrado, UFPE, Maio 1996.
- [5] FONTE, L. A. M., *Reatores Saturados ; Alguns Aspectos Operacionais e de Projeto*, Dissertação de Mestrado, UFPE, Dezembro 1977.
- [6] FERREIRA, F. M. C., *Aplicação de Reatores com Saturação Natural em Sistemas de Extra Alta Tensão*, Dissertação de Mestrado, UFPE, Dezembro 1998.
- [7] LEAL, F., *Reatores Saturados com Excitação Paralela*, Dissertação de Mestrado, UFPE, Dezembro 2000.
- [8] FONTE, L. A. M., *Desenvolvimento de Reatores com Saturação Natural para Aplicação em Sistemas de Potência*, Tese de Doutorado, UFPE, Fevereiro 2004.
- [9] CARVALHO, M. A. e FONTE, L. A. M., *Increasing the Capacity of Long EHV Transmission Lines*, IEEE / PES Transmission and Distribution Latin America Conference, São Paulo, 2001.
- [10] CARVALHO, M. A. e FONTE, L. A. M., *Increasing the Capacity of Long EHV Transmission Lines by Saturated Reactors*, XIV CBA, Congresso Brasileiro de Automática, Natal, 2001.
- [11] CARVALHO, M. A., FONTE, L. A. M., ALVES, F. R. e MELO, M. O. B. C., *Modelagem dos Reatores Saturados para Estudos Transitórios*, III ENEAT, Encontro Nacional de Extra Alta Tensão, Campina Grande, 1999.
- [12] CARVALHO, M. A. e BRASIL, D. O. C., *Aplicação de Reatores Saturados em Sistemas de Potência*, XIII SNPTEE, Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, Florianópolis, 1995.
- [13] CARVALHO, M. A. e FONTE, L. A. M., *Controle de Tensão em Transitórios e em Regime Permanente de Linhas Longas de Transmissão em EAT*, XVI SNPTEE, Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, Campinas, 2001.
- [14] CARVALHO, M. A., LEAL, F. S. e FONTE, L. A. M., *Aplicação de Supressores Rápidos de Tensão à base de Reatores Saturados em Sistemas de Distribuição*, XVII SNPTEE, Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, Uberlândia, 2003.
- [15] FERREIRA, F. M. C., FONTE, L. A. M. e CARVALHO, M. A., *Reator com Saturação Natural : Alguns Aspectos de Projeto e Aplicação*, VI SEPOPE, Simpósio de Especialistas em Planejamento da Operação e Expansão Elétrica, Salvador, 1998.
- [16] VLADISLAVLEV, M. N., POOL, A. T., TELLINEN, J. e JARVIK, J., *Anticipated Technical-Economic Indices of a 525 kV, 180 MVA Saturated Reactor*, Soviet Electrical Engineering, vol.62, no.2, 1991, pp.60-63.
- [17] KAWASAKI STEEL CORPORATION, *RG-H :High Magnetic Induction Grain Oriented Silicon Steel*, Publication HEA1A- 004- 8102 A c, Japan, 1981.
- [18] ACESITA GRÁFICOS, *Planilha Eletrônica*.
- [19] IEEE Std.519, *IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems*, May, 1996.
- [20] MARTIN, J. C., *Teoría, Cálculo y Construcción de Transformadores*, Editorial Labor S. A., 3ª edición, Barcelona, 1954.
- [21] LIWSCHITZ, M., *Calcul des machines Électriques*, Editions SPES S.A., 1ª edition, Lausanne, 1967.